3N1-OS-21-1

反転分布に対称性を仮定した関係縮約

Distribution equivalent groups for supporting frame generation function in the hippocampus circuits

山川 宏[*1]
Hiroshi Yamakawa

[*1] ㈱富士通研究所
FUJITSU LABORATORIES LTD.

The function for generating frame (which we call framic wiring composer: FWC) for flexible prediction is not realized on today's computer and is technologically attractive. We presume that the FWC function is installed on the hippocampus in the brain, because of some supporting evidences. Moreover, relationship equivalences (REs) are necessary to implement the FWC function. Findings of hippocampus such as the theta phase precession and the configural association theory were taken into account for designing representation of REs. Distribution equivalent groups (DEGs) which are multi-dimensional partial space containing several cases could be promising candidate of REs. We estimated the number of DEGs for multi-dimensional binary lattice. It was shown that DEGs with over 8 or 9 dimensions has enough number of states for classifying potential REs in the hippocampus containing several hundred thousand excitatory neurons.

1. はじめに

現状計算機で未実現の知能を生体から学ぶことは，将来の技術的特異点にも繋がる創造性を持つAIのヒントになり得ると考え，脳内の未解明計算機能を探る研究を進めている．プロ棋士の直観力脳科学研究から，柔軟な予測能力は長年の鍛錬で新皮質上に獲得された表象によると考えられた．卓越した能力の実現には，何を比較するかを規定するフレーム(複数の変数と，複数の事例のマトリックス)の柔軟な構築が重要で，予測に関わる値を互いに指定する関係等価性を蓄える必要がある[山川 2011]．ただし本稿では，個々の神経細胞活動を変数とみなせる脳を参考にするため，変数間の関係等価性に着目する．

そこで本稿では，こうしたフレーム状の配線を生成する機能をFramic Wiring Composer (FWC)と呼ぶこととする．そして幾つかの理由から FWC を担う脳部位として海馬が有力であることを述べ，次に海馬神経回路の特徴からそこで用いる表現単位の性質を特定する．そして，その表現単位が，海馬が扱う高次元データからフレームを生成する際に利用する関係等価性として十分に多用な状態数を持つことを評価する．

1.1 Framic Wiring Composer (FWC)としての海馬

海馬は，以下の 4 つの理由より FWC 機能を担うと推定できる．

第 1 に，脳内では基本的に非言語的な情報表現を用いるので，関係が等価であることを分散させては表現できない．よって大脳新皮質上の異なる領野を跨いだフレームを形成するには，分散して蓄積された情報を集約しうる脳部位に関係等価性が存在すべきである．海馬は嗅内皮質を通じて新皮質の広い領野からの投射を受ける[Penner 2012]ので，妥当な候補となる．

第 2 に，直観力を支える新皮質上の表象は，長年の経験の蓄積を通じて形成される．そして経験は，一旦海馬に蓄えられ，ヒトであれば数ヶ月をかけて徐々に新皮質に転送される．よって新皮質上のフレーム表現はそれ以前に海馬上に予め生成されていると考え得る[Kitamura 2009]．

第 3 に海馬の歯状回から CA3 にわたり，クロスバースイッチの様に任意の入力を任意の出力に接続できる神経回路が存在するが，これはフレーム生成に適した構造である[Lisman 2007]．

第 4 に，海馬が有する外部環境についての認知地図を実現するには，自己中心座標系として観測される生体への入力刺激を，環境中心座標系に変換する必要がある[渡辺 2008]．こうした座標変換は動的なフレーム切り替えの一例と考えうる．

連絡先：山川宏，㈱富士通研究所，*ymkw@jp.fujitsu.com*

1.2 海馬内の表現単位

海馬研究の歴史は古く，多くの実験結果やそれに基づく仮説が存在するが，特に表現単位に関わる知見として以下がある．

一つ目に，シータ位相歳差と呼ばれる現象がある．動物が実験フィールド内を走り回る際に，海馬には約 5Hz のシータリズムが生成され，その位相の中に離散化された 7～12 個の事例列が時間的に圧縮して表現される現象である[Yamaguchi 2003]．

二つ目に，海馬の機能的役割を説明する構成連合仮説[渡辺 2008]によれば，海馬は個々の刺激ではなく刺激の組み合わせ(複合)と行動の意義を連合する．海馬損傷動物では単純に刺激間の連合記憶ができても，複数の刺激を集合的に記憶してタスクを実行することはできなくなる．

上記の特徴を踏まえると海馬における表現単位は，多次元の部分空間における 10 個程度の事例集合としても良さそうである．

2. 分布等価群の状態数評価

2.1 分布等価群: 対称性により縮約された表現単位

FWC の機能は，等価な関係を内包する同一次元の部分空間のペアを高次元データから見つけることである．ここで N 次元変数のデータから d 次元の部分空間を取り出しうる全組み合わせ数を部分空間総数 $S_N(d)$とすれば，$S_N(d) = {}_N C_d$ (～ $N^d/d\,!$) である．海馬に存在しうる d 次元部分空間における 10 個程度の事例集合を表現単位として FWC 機能を実現するには，その表現単位が分類しうる状態数が，部分空間総数 $S_N(d)$に匹敵する必要がある．なお海馬の主要な部位における興奮性細胞数は十万個オーダー(歯状回:約 80 万個，CA1:約 40 万個，CA3:約 30 万個)であるから N=10^5~10^6 である．

上記の表現単位を用いて同じ次元数をもつ部分空間同士を比較する際には，その部分空間に含まれる変数を交換して同一の分布となる場合(変数交換対称性)や，ある変数内で値を入れ替えたら同一の分布となったりする場合は，等価とみなしうる．そこで，こうした対称性で纏め上げられる d 次元部分空間における 10 個程度の事例集合を分布等価群(Distribution Equivalent Group : DEG)と呼ぶこととし，これを関係等価性の評価に用いる表現単位と考える．

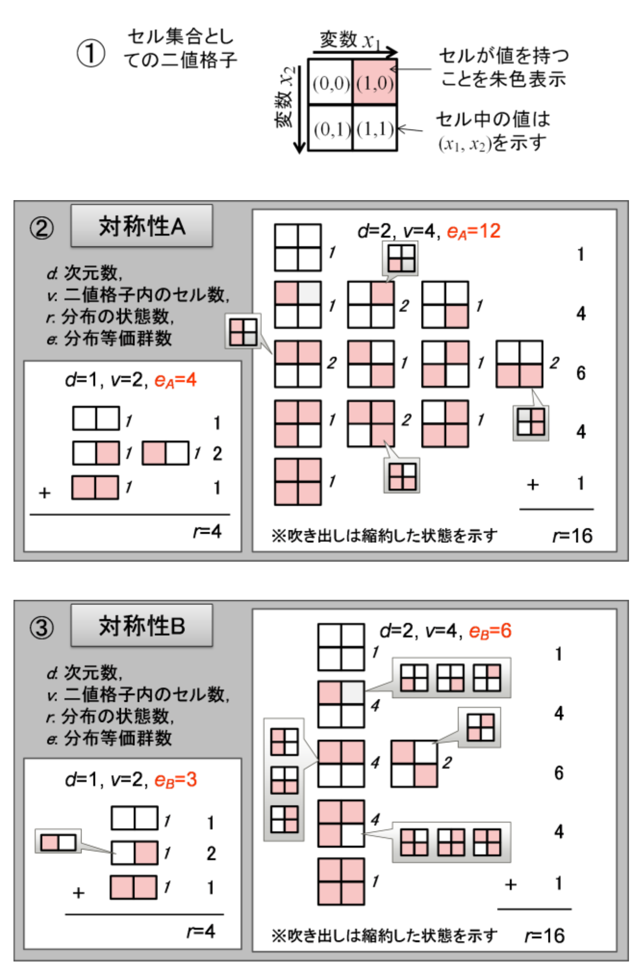

図 1 :低次元における分布等価群

①二値格子(2 次元)の例, ②対称性 A: 変数交換対称性のみ, ③対称性 B: 変数交換対称性および反転分布対称性

2.2 二値変数における分布等価群(低次元での例)

分布等価群の状態数を見積もるため，図1-①に示すように，二値変数でなおかつ値を持つセル中では事例の有無だけを考慮する(事例数を考慮しない) 単純な二値格子を考える． 変数交換対称性のみを考慮する条件を対称性 A として低次元の場合を図1-②に示す．二値変数の組み合わせから生成される二値格子を次元(d = 1〜2) 毎に示し，二値格子内のセル数を v，分布の状態数を r，分布等価群の状態数に相当する分布等価群数を e とした．各二値格子の右側に対称性から生ずる縮約度を記した．事例を保持するセル数が同数の二値格子を同列に表記し，その右端に状態数の総和を記した．次元数 d=1 の場合には交換できる変数が無いので，対称性による縮約はない．次元数 d=2 となれば，例えば，二列目の中央の二値格子では変数の入れ替えによって異なる状態を縮約するので縮約度が 2 となっている．

二値変数では特定変数内の値の入れ替えは反転分布対称性となる．変数交換対称性と反転分布対称性の両方を考慮した対称性 B の場合では，図1-③に示すように縮約度が高くなる．

2.3 二値分布等価群の高次元での表現状態数評価

N 次元データにおける部分空間総数 $S_N(d)$は，図2に示すように次元数 d に対し概ね指数オーダで増加する．分布等価群を用いて，これらを分類可能とするためには，分布等価群数 e が，部分空間総数 $S_N(d)$ と同程度のオーダである必要がある．

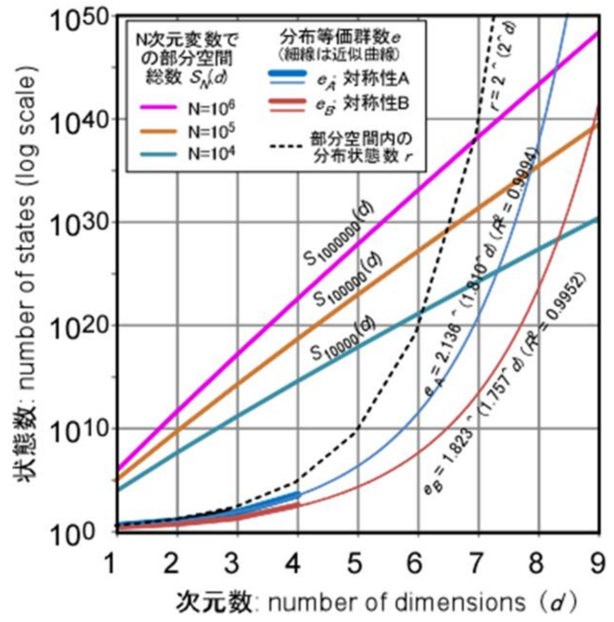

図 2：分布等価群数 e の次元数 d による変化

そこで 4 次元以下では分布等価群数 e を実測し[1], 5 次元以上については対数状態数において指数関数近似で外挿することで，対称性 A／B 夫々についての分布等価群数 e_A/e_Bを見積もった．これら状態数は対称性により縮約されるので，d 次元部分空間内の分布の状態数 r を下回った値となる．

その結果，対称性 A での分布等価群数は e_A = 2.136 ^ (1.810^d)で近似でき，8 次元の分布等価群であれば，10 万次元以上の変数における部分空間総数 $S_{100000}(d)$の分類に十分な状態数を持つ．対称性 B での分布等価群数は e_B = 1.823 ^ (1.757^d)で近似でき，部分空間が 9 次元の分布等価群であれば同様に十分な状態数を持てる．

3. まとめ

海馬が FWC 機能を担うという仮説に立脚し，海馬研究から導かれてきた構成連合仮説とシータ位相歳差現象を参考とすれば，海馬内における関係等価性の表現単位としては，対称性を考慮した分布等価群が有力候補であると考えられた．

そこで本稿では，分布等価群が，海馬に存在する高次元データについての部分空間総数 $S_N(d)$を分類するために十分な状態数を持つ可能性を評価した．すると，分布等価群の次元数 d を 8 もしくは 9 以上とすれば，海馬神経回路における数十万個の変数集合から等価な関係性を内包する部分空間を発見する状態数を持ちうることを示した．以上より，海馬内に存在しうる分布等価群は，関係等価性の表現単位である可能性が高まった．

参考文献

[山川 2011] 山川宏, JSAI2011, 2C2-OS2b-4 , 2011.

[Penner 2012] Penner MR, Mizumori SJ., Prog Neurobiol., 96(1): 96-135, 2012.

[渡辺 2008] 渡辺茂他: 比較海馬学，ナカニシヤ出版，2008.

[Kitamura 2009] Kitamura T., et.al, Cell, 139,4, .814-827, 2009.

[Lisman 2007] Lisman JE. Prog Brain Res. 163:615-818, 2007.

[Yamaguchi 2003] Yamaguchi Y., Biol Cybern., 89(1):1-9. 2003.

[1] 指数関数以上の計算コスト増で簡易な見積りでは 4 次元が限界